

城市湖泊生态系统健康评价与修复研究

沈颜奕, 陈星

(河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 城市湖泊是城市湿地重要的组成部分,随着我国城市化进程不断地发展,对城市湖泊各种资源的需求日趋加强。在分析城市湖泊特征的基础上,提出了城市湖泊健康的内涵,基于此内涵构建评价指标体系,从自然湖泊状态、人-水关系的健康两方面提出12个指标描述城市湖泊生态系统的健康,并给出各指标的量化标准。以苏州市吴江市潜龙渠为例进行研究,计算表明潜龙渠健康综合指数2011年与2014年分别是0.343和0.582,可见潜龙渠已从“微病态”过渡为“亚健康”状态,湖泊生态环境改善明显,说明该指标体系适用性较强,充分体现城市湖泊的特征,评价结果较为客观,易于推广。评价结果表明,潜龙渠生态修复措施颇有成效,梳理潜龙渠生态修复方案以供其他城市湖泊借鉴,为城市湖泊生态系统的管理、治理提供决策依据与经验。

关键词: 城市湖泊; 生态系统健康评价; 生态修复; 潜龙渠

中图分类号: X524; Q14

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0082-04

Study on health assessment and restoration of urban lake ecosystem

SHEN Yanyi, CHEN Xing

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Urban lake is an important part of city wetland. With the continuous development of urbanization process, the demand for various resources of urban lakes has become increasingly strengthened. Based on the analysis of the characteristics of urban lake, the concept of urban lakes' health were put forward and the evaluation index system from the natural state of lakes and man - water relationships was constructed. Then 12 indexes to describe the urban lake ecosystem health were put forward, and the quantitative standard of each index was given. Qianlong Lake in Wu Jiang was used as an example for research. The results showed that, the comprehensive health index of Qianlong Lake in 2011 and 2014 were 0.343 and 0.582, respectively. It meant that Qianlong Lake had transformed from "micro pathological" to "sub-health" state. The ecological environment improvement of the lake was obvious, which showed that the index system had strong applicability, fully embodied the characteristics of the urban lakes. The evaluation results were objective and easily to extend. The assessment results showed that, the ecological restoration measures of Qianlong Lake was quite effective, so the Qianlong Lake ecological restoration system were arranged and supplied references for other urban lakes, it provided decision-making basis and experiences for the management of urban lake ecological system.

Key words: urban lake; ecosystem health assessment; ecological restoration; Qianlong lake

城市湖泊为城市提供了丰富的服务功能,在城市发展中起着重要的作用。然而,随着我国城市化进程不断地推进,一方面,对城市湖泊各种资源的需求增加;另一方面,人类活动使城市湖泊水体污染严重、面积锐减、湖泊生态系统遭到严重破坏,大大减

弱了其生态系统服务功能。

自20世纪70年代提出生态系统健康以来,这一概念在森林、草原、湿地、荒漠等领域不断发展。对于湖泊生态系统,认同度较高的为Costanza提出的概念^[1],包括:

收稿日期:2016-09-03; 修回日期:2016-11-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51209071、51579148)

作者简介:沈颜奕(1992-),女,浙江嘉兴人,硕士研究生,研究方向为水文水资源。

通讯作者:陈星(1980-),女,新疆伊宁人,博士,副教授,研究方向为水文水资源。

- (1)具备稳定性和可持续性;
- (2)能够维持自身组织结构;
- (3)具备自我调节能力;
- (4)对外界干扰有恢复能力。

目前国内外开展的湖泊生态系统健康评价研究中多以生态指标为主要评价指标^[2],但人类活动对城市湖泊的影响日益加强,仅生态指标不能全面地评价城市湖泊的健康程度,故针对城市湖泊生态系统的研究尤为重要。本文以苏州市吴江区潜龙渠为研究对象,在分析城市湖泊特征的基础上,提出了城市湖泊健康的内涵,基于此内涵构建评价指标体系,并得出评价结果,同时梳理潜龙渠生态修复的技术体系,为城市湖泊生态系统的管理、治理和修复提供了参考和决策依据。

1 城市湖泊生态系统健康内涵

城市湖泊指位于城市城区或近郊的小型湖泊,其价值更多地体现在洪涝调蓄、调节气候、改善城市生态环境以及休闲旅游等方面。相对于自然湖泊,城市湖泊受人类活动的影响更多,人类活动如渔业养殖、航运、污水排放、化肥施用等行为对湖泊的生态系统健康产生了重要的影响;同时,城市湖泊需要承担更多的生态服务,如水文调节能力、娱乐旅游、景观文化等功能,新形势下对城市湖泊提出了更高的要求。

本文结合城市湖泊的特点,认为城市湖泊生态系统健康的内涵包括:(1)自然意义上即湖泊自身的健康,也就是湖泊内的关键生态组分和有机组织完整且没有疾病,受突发的自然或人为扰动后能保持原有的功能和结构,物质循环、能量和信息流动未受到损害,整体功能表现为多样性、复杂性和活力^[3];(2)人-水关系的健康,也就是其生态系统服务功能完善,有能力满足人类社会合理需求^[4]。

2 研究区域和研究方法

2.1 研究区域概况

潜龙渠位于苏州市吴江区南部的盛泽镇西北,地处富饶的沪宁杭金三角中心。研究区气候属于北亚热带海洋性季风湿润区,秋、冬季以西北风为主,春、夏季以东南风为主。多年平均气温为 15.3℃,多年平均降雨量为 1 074.1 mm,年最大年降水量为 1 393.4 mm。潜龙渠为圩内湖荡,位于坛东联圩东北,潜龙渠周边水系布局见图 1。目前坛东联圩圩内有 10 条主要河道,初步形成“三横两纵”的水系

格局。圩内水面积为 4.68 hm²,水面率为 9.51%。



图 1 潜龙渠现状周边水系布局图

2.2 评价指标体系构建

根据城市湖泊的特点,从湖泊的自然状态、人-水关系两方面构建指标体系,采用层次分析法确定各指标的权重,将指标归一化后计算湖泊的健康综合指数,并根据潜龙渠的具体情况,对潜龙渠进行评价。由于 2011 年对潜龙渠进行规划修复,2012 年 4 月至 2013 年 7 月进行清淤修复建设,本文采用 2011 年与 2014 年的数据对潜龙渠生态系统进行评价,对比修复前后生态系统的健康状况。湖泊生态系统健康水平具体可分为 5 类:很健康、健康、亚健康、微病态、病态。

2.2.1 指标构建 根据上述城市湖泊生态系统健康内涵,构建城市湖泊生态系统健康 3 层评价指标体系,目标层为城市湖泊生态系统健康,约束层分为自然湖泊状态、人-水关系的健康两方面,自然湖泊状态分为理化特征和生态特征两个子约束层,人-水关系分为系统服务功能和人类活动干扰两个要素,最终构建由 12 个指标组成的指标层(见表 1)。并计算评价指标间的相关系数,结果显示各指标间相关系数均小于 0.5,故认为各指标反映内容无重叠,指标体系科学合理。

2.2.2 指标评价标准 湖泊自然状态反映了湖泊自身的功能和结构,物质循环、能量和信息流动等状态^[5]。理化特征选择岸线发展系数、沿岸带宽度、化学需氧量 COD 和氨氮。其中岸线发展系数反映岸线的不规则程度,若湖岸曲折多变,则其岸线发展系数越大。采用湖泊岸线长度与等于该湖泊面积的圆的周长之比表示^[6],如下式:

$$D_L = \frac{L}{2\pi \sqrt{\frac{A}{\pi}}} = \frac{L}{\sqrt{2\pi A}} = 0.282 \frac{L}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

式中： L 为湖泊岸线长度， m ； A 为与该湖泊面积相等的圆的面积， m^2 。

生态特征选择水体自净能力和生物多样性。水体自净能力反映了湖泊水体的净化能力，体现其对外界干扰的抵抗力^[7]，本文以湖泊入湖与出湖主要污染物浓度的变化率作为量化标准。物种多样性反映了生物的丰富度，针对湖泊水生物，由于鱼类比较具有代表性，且对外界环境变化敏感，故本文采用湖泊中鱼类种数占该湖泊所在生物地理区鱼类种数的百分比作为评价标准^[8]。

人－水关系的健康反映了城市湖泊其各项系统服务功能都能正常发挥以及满足人类社会合理需求的能力。生态系统服务功能主要考虑生物栖息地功能、供水保证率和景观多样性指数。其中，生物栖息地功能指标将其退化率作为评价标准；景观多样性指数用来度量生态系统结构组成复杂程度，景观多样性指数高，物种多样性丰富，生态系统稳定，抵御外界干扰的能力强。

$$I_{SHDI} = - \sum_{k=1}^m P_k \ln(P_k)$$

(2)

表 1 城市湖泊生态系统健康评价指标体系表

目标层	约束层	权重	子约束层	权重	指标层	权重	最佳值	属性
城市湖泊生态系统健康评价	自然状态	0.417	理化特征	0.667	岸线发展系数	0.168	1.5	↓
					沿岸带宽度/ m	0.192	30	↑
					化学需氧量 $COD/(mg \cdot L^{-1})$	0.358	15	↓
			生态特征	0.333	氨氮/ $(mg \cdot L^{-1})$	0.282	0.5	↓
					水体自净能力/%	0.417	50	↑
					生物多样性/%	0.583	20	↑
	人水关系	0.583	系统服务功能	0.437	生态栖息地/%	0.227	2	↓
					供水保证率/%	0.318	95	↑
					景观多样性指数	0.455	1.1	↑
			人类活动干扰	0.563	渔业养殖面积比例/%	0.307	10	↓
					岸线建设用地占用率/%	0.220	15	↓
					入湖污染指数	0.473	0.5	↓

2.3.2 健康综合指数评价 为定量地评价城市湖泊生态系统的健康状态，本文通过多指标的综合评价对湖泊的健康状况进行评定，采用综合健康指数法描述湖泊的健康状态。计算公式如下：

$$CHI = \sum_{i=1}^n w_i \times I_i$$

(3)

式中： n 为指标的个数； I_i 为指标 i 的归一化值； w_i 为指标 i 的权值，其值在 0 到 1 之间取值，当取值为 0 时，湖泊健康状态最差；取值为 1 时，湖泊健康状态最好。为了更详细地描述湖泊健康状态，将 CHI

式中： I_{SHDI} 为 Shannon 多样性指数； P_k 为景观类型 k 所占面积比，%； m 为景观类型数目^[9]。

人类活动干扰选择渔业养殖面积比例、岸线建设用地占用率和入湖污染指数。其中，入湖污染物使湖泊的状态改变，进而影响湖泊的健康状况。根据湖泊水环境容量计算，当入湖污染物小于水环境容量时，湖泊对污染能消除，使湖泊处于稳定状态，而当入湖污染物大于水环境容量时，湖泊平衡状态被破坏，有可能造成湖泊富营养化。故本文取入湖污染物量与水环境容量比值作为入湖污染指数评价。

2.3 模型计算

2.3.1 确定指标权重 为克服确定指标权重的主观性，提供指标赋权的一致性，本文采用层次分析法确定各指标权重。首先分别构造各层级的判断矩阵，按 9 分位比率排定各要素相对重要性程度。计算矩阵最大特征值与对应特征向量，归一化后得到各要素的权重值。最后进行一致性检验，若不满足，则调整判断矩阵直至满足一致性，最终确定约束层、次约束层与指标层各要素的权重（见表 1）。

值分为 5 个区间：1.0 ~ 0.8、0.8 ~ 0.6、0.6 ~ 0.4、0.4 ~ 0.2、0.2 ~ 0，分别对应很健康、健康、亚健康、微病态、病态共 5 个健康状态^[10]。

2.3.3 指标归一化 指标值归一化时，一般取序列中的相对最佳值为 1，但由于资料的限制，本文只选取 2011 年与 2014 年的资料，故参考国家标准、地方法规、区域规划与相关文献中的特征值作为最佳值（表 1）。若该指标是正向指标，则其值与最佳值的比值作为其归一化后的值；若该指标是逆向指标，则其值与最佳值的比值的倒数作为其归一化后的值^[11]。

3 评价结果及分析

根据 2011 年和 2014 年潜龙渠的实际情况利用上述评价模型进行计算,最终得到如下结果:

由表 2 的计算结果可见,潜龙渠生态系统 2011 年的健康状态为微病态,2014 年的健康状态为亚健康,评价结果与潜龙渠的实际变化情况基本一致。

表 2 潜龙渠生态系统健康评价综合健康指数		
评价项目	2011 年	2014 年
综合健康指数	0.343	0.582
健康状态	微病态	亚健康

2011 的潜龙渠综合健康指数评价看,入湖污染指数、水体自净能力、化学需氧量 COD、氨氮等多项指标评分均很低。由于近年来,随着潜龙渠周边地区工农业的迅猛发展,其中纺织业发达,其对水体污染严重,造成了该区域水体的严重污染;同时,由于农村排污系统不完善,大多数农民将生活污水随意排放,或排放到附近的水沟或河里,导致河水有异味,水华现象严重。据调查,全镇化肥、农药平均施用总量呈上升趋势,潜龙渠北侧主要为农业用地,大量氮磷营养随地表径流冲刷进入地表水,加剧了水体富营养化。根据现场调查,潜龙渠周边连通河道水质较差,与潜龙渠贯通的野河荡受围网养殖、农业面源污染以及生活污水的影响,湖泊氮、磷等营养物质超标,水质较差;而潜龙渠东部的京杭运河水质受排污和航运的影响,水质类别较低,从而间接影响了潜龙渠的水质。

2014 年较 2011 年指数提升的原因主要是潜龙渠清淤补水后采取全面截污,工农业及生活污水的排放为零,只有少部分的面源污染;2012 年的清淤大大减少了湖泊的内源污染;湖泊岸线的调整有利于提高水体流动性、加强物质交换;另外生态护坡、水生植物、生态湿地等措施的应用,使得修复后潜龙渠的水质大幅度的提升;另外潜龙渠生态湿地公园的落成,大大增加了湖泊的景观服务功能。

4 生态修复体系构建

根据上述评价结果,说明潜龙渠生态修复较为成功,各生态修复措施实施后,湖泊生态环境改善明显,可供其他城市湖泊借鉴的生态修复技术体系如下:

(1)污染源控制。大量污水进入河湖水体是导致水质恶化、水生态破坏最普遍的原因,而控制污染

源是根本解决途径。点源污染控制可通过管网收集污水,将其输送至污水处理厂;发展生态农业,减少农药化肥的使用量,禁止围网养殖是控制面源污染的重要措施。此外,底泥淤积是水体内源污染的主要原因,通过清淤能有效减少湖底沉积物的含量,从而减少沉积物中营养盐的释放^[12]。

(2)湖泊形态调整。湖泊形态结构特征与湖泊健康水平密切相关,对湖泊原有形态的调整可以增加水体的流动性,减少滞水区,优化岸线形态,使得沿岸带为缓坡,有利于水生植物生长和水生动物栖息,湖泊岸线总长度有所增加,加强了沿岸带物质交换,动植物的栖息生长空间随之增加。

(3)自我调节能力提升。对于面积较大浅水区域和有较多污染物汇入的区域,建设人工湿地,利用湿地强有力污染物吸附降解能力,改善局部水环境,重建稳定的生态系统,进而通过水生动植物繁殖,不断扩展净化水域^[13]。对于湖泊护岸,在保证防洪标准的前提下,采取理想的湿地护岸生态工程技术。

(4)辅助措施。采取生物操纵、生态浮床、曝气等辅助措施,人工营造一个动物、微生物良好的生长环境,在提高水体的自净能力的同时,增强湖泊的可观赏性,不断改善水生生态系统的结构和功能,最终构建稳定的湖泊生态系统。

5 结 论

本文从湖泊的自然状态、人-水关系两方面构建指标体系对湖泊健康进行评价,并梳理生态修复体系研究结论如下:

(1)城市湖泊生态系统健康评价指标体系研究结果显示,人-水关系较湖泊自然状态更为重要,次约束层各要素的重要性排序为人类活动干扰>理化特征>生态系统服务功能>生态特征,综合权重前 3 位分别为入湖污染量、渔业养殖面积比例、化学需氧量 COD,这与实际情况相符,污染物大量入湖、人类的过度开发与水环境恶化是城市湖泊生态系统退化的主要原因。

(2)综合评价结果显示,潜龙渠 2011 年生态系统健康状况为微病态,经过生态修复后,2014 年过渡到亚健康状态。评价结果与潜龙渠的实际变化情况基本一致,验证了本文运用综合健康指数法评价城市湖泊生态系统健康状况的实用性和可靠性。

(3)根据潜龙渠生态修复的经验,构建城市湖泊生态修复体系,包括湖泊岸线调整、污染源控制、

(下转第 91 页)

与河湖水系连通系统耦合协调度不断提升,促进江苏省人水和谐。

参考文献:

[1] 左其亭,崔国韬. 河湖水系连通理论体系框架研究[J]. 水电能源科学,2012,30(1): 1-5.

[2] 窦明,崔国韬,左其亭,等. 河湖水系连通的特征分析[J]. 中国水利,2011(16):17-19.

[3] 崔国韬,左其亭,李宗礼,等. 河湖水系连通功能及适应性分析[J]. 水电能源科学,2012,30(2):1-5.

[4] 王中根,李宗礼,刘昌明,等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(3):523-529.

[5] 李宗礼,郝秀平,王中根,等. 河湖水系连通分类体系探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(11):1975-1982.

[6] 夏军,高扬,左其亭,等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. 地理科学进展,2012,31(1):26-31.

[7] 李原园,黄火键,李宗礼,等. 河湖水系连通实践经验与发展趋势[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(4):81-85.

[8] 李原园,酆建强,李宗礼,等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J]. 资源科学,2011,33(3):386-391.

[9] 庞博,徐宗学. 河湖水系连通战略研究:理论基础[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(Z1):138-145.

[10] 庞博,徐宗学. 河湖水系连通战略研究:关键技术[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(Z1):146-152.

[11] 范斐,杜德斌,盛垒. 长三角科技资源配置能力与城市化进程的协调耦合关系研究[J]. 统计与信息论坛,2013,28(7):69-75.

[12] 刘耀彬,李仁东,宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. 自然资源学报,2005,20(1):105-112.

[13] 张明斗,莫冬燕. 城市土地利用效益与城市化的耦合协调性分析——以东北三省34个地级市为例[J]. 资源科学,2014,36(1):8-16.

[14] 孙东琪,张京祥,张明斗,等. 长江三角洲城市化效率与经济发展水平的耦合关系[J]. 地理科学进展,2013,32(7):1060-1071.

[15] 左其亭,臧超,马军霞. 河湖水系连通与经济社会发展协调度计算方法及应用[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(3):116-120.

[16] 刘耀彬,李仁东,宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]. 地理学报,2005,60(2):237-247.

[17] 赵安周,李英俊,卫海燕,等. 陕西省城市化与资源环境的耦合演进分析[J]. 农业现代化研究,2011,32(6):725-729.



(上接第 85 页)

自我调节能力提升以及生物操纵、生态浮床、曝气等辅助措施,可对其他城市湖泊的治理提供借鉴。

参考文献:

[1] 李瑞改,许振文,刘惠清. 生态健康评价[J]. 长春师范学院学报,2004,23(1):60-64.

[2] 赵臻彦,徐福留,詹巍,等. 湖泊生态系统健康定量评价方法[J]. 生态学报,2005,25(6):1466-1474.

[3] 胡志新,胡维平,谷孝鸿,等. 太湖湖泊生态系统健康评价[J]. 湖泊科学,2005,17(3):256-262.

[4] 席秋义,徐建光,张洪波,等. 河流生态水文系统研究[J]. 人民黄河,2010,32(8):10-12.

[5] 任黎,杨金艳,相欣奕. 湖泊生态系统健康评价指标体系[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):100-103.

[6] 李新国,江南,王红娟,等. 近30年来太湖流域湖泊岸线形态动态变化[J]. 湖泊科学,2005,17(4):294-298.

[7] 李灿,李永,李嘉. 湖泊健康评价指标体系及评价方法初探[J]. 四川环境,2011,30(2):71-75.

[8] 孔令阳. 江汉湖群典型湖泊生态系统健康评价[D]. 武汉:湖北大学,2012.

[9] 陈星,许钦,何新玥,等. 城市浅水湖泊生态系统健康与保护研究[J]. 水资源保护,2016,32(2):77-81.

[10] 许文杰. 城市湖泊综合需水分析及生态系统健康评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.

[11] 戈锋,叶春,冯冠宇,等. 基于熵权综合健康指数法的太湖湖滨带水生态系统研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2010,39(6):623-626.

[12] 朱敏,王国祥,王建,等. 南京玄武湖清淤前后底泥主要污染指标的变化[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2004,4(2):66-69.

[13] 丁飞跃. 城市河道水环境生态治理研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.